

短距离无线音频传输系统的模块化设计

仲崇锦, 陈家琦, 时翔

常州工学院计算机信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2023年5月3日; 录用日期: 2023年6月21日; 发布日期: 2023年6月27日

摘要

本文设计了一种基于红外光通信的音频信号短距离无线传输系统, 以红外发光管和红外光接收模块作为收发器件, 在1 m的传输距离内, 实现了音频信号的短距离无线传输。系统不同于以往基于参数与功能相对固定的芯片模块, 而是采用分立模块化设计, 发射组件与接收组件的各个功能模块各自独立又相互联通, 能够在功能实现的条件下, 方便地进行模块替换及可重构式的技术更新升级。

关键词

红外光通信, 语音传输, 无线传输, 模块化

Modular Design of Short-Distance Wireless Audio Transmission System

Chongjin Zhong, Jiaqi Chen, Xiang Shi

School of Computer Science and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: May 3rd, 2023; accepted: Jun. 21st, 2023; published: Jun. 27th, 2023

Abstract

This article designs a short-distance wireless transmission system for audio signals based on infrared light communication, using infrared light emitting diodes and infrared light receiving modules as transmitting and receiving devices. Within a transmission distance of 1 m, the short-distance wireless transmission of audio signals is achieved. The system is different from previous chip modules based on relatively fixed parameters and functions, but adopts a discrete modular design. The functional modules of the transmitting and receiving components are independent and interconnected, allowing for convenient module replacement and re-configurable technology updates and upgrades under the conditions of functional implementation.

Keywords

Infrared Light Communication, Voice Transmission, Wireless Transmission, Modularization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

短距离无线传输系统已广泛应用于万物互联的城市智能家居、个人穿戴设备、智慧工厂等领域。通用的短距离无线传输系统往往基于参数(频率、调制方式、功率等)与功能相对固定的集成电路芯片, 该种通信芯片通常是将通信的发射与接收系统, 集成在一块芯片上, 设计者只需进行基于该芯片的外围电路设计及其综合应用, 即能够设计制作功能良好的短距离无线传输系统[1]-[7]。高集成度的 WIFI [1] [2]、蓝牙[3] [4]、Zigbee [5] [6]、GPRS [7]等无线收发芯片在智能家居、智慧城市等的短距离无线通信应用带来了便利, 但基于芯片的系统设计与制作可能会受到芯片流片生产国或地区的技术壁垒或产能限制。此外, 一款功能完善的高集成度无线收发芯片的升级、换代, 从芯片设计到流片生产过程中, 耗时间漫长, 资金巨大, 也往往限制了短距离无线数据传输技术的飞速发展。

红外光通信已广泛应用于物联网应用领域[8] [9], 本文基于模块化设计, 进行了一种基于红外光通信的音频信号短距离无线传输系统的研究。系统不采用高度集成、参数与功能相对固定的无线收发芯片与模块, 而是将红外发射支路与红外接收支路进行模块化分立设计, 发射支路与接收支路的各个功能模块各自独立又相互联通。系统采用模块化设计的目的是各模块均能单独替换和升级, 即具有可重构的特性。无线发射和无线接收模块采用红外发射管和红外接收管实现, 并可用其他工作波长的光电器件、射频器件进行更新替换或功能升级。构成发射支路的功率放大器、滤波器、调制器模块等, 以及构成接收支路的信号放大器、解调器、滤波器模块等, 均能够替换或更新为其他电路参数的功能模块。

2. 系统总体设计

2.1. 系统框架的建立

系统设计采用模块化设计思路, 将产品功能划分为发射机和接收机两部分。发射机部分包括电源供给电路, 音频转换电路、低频放大电路、滤波电路, 信号调制电路、功率放大电路以及无线发射电路; 接收机部分包括电源供给电路, 无线接收电路, 小信号放大电路、信号解调电路、中频放大电路、检波电路和音频放大输出电路。系统整体框架如图 1 所示, 在该框架图中, 系统的信号调制电路与解调电路共用一块芯片, 因而合并成一个模块。

2.2. 系统的工作原理

系统的工作原理是在声音被转换成电信号并且被放大、滤波器滤除环境噪声之后, 红外发射管被驱动以发射和输出随声音幅度变化的辐射红外光。红外接收端会同步接收辐射红外光并将其转换为电信号, 然后放大驱动扬声器, 实现红外光语音通信[8] [9]。

系统发射机的工作流程如下: 音频信号(如 MP3 的音乐信号)通过音频转换模块转换为十分微弱的电信号, 进行低频放大, 滤波电路用来滤除环境、电流噪声对音频信号的影响。滤波处理后的音频信号经

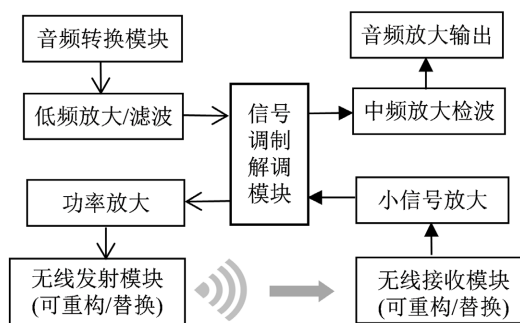


Figure 1. Block diagram of audio signal short-distance wireless transmission system

图 1. 音频信号短距离无线传输系统框图

信号调制电路进行脉冲宽度调制(PWM)，调制波经功率放大后，驱动红外发射管向外发射带有音频信号频谱特征的红外光信号。

系统接收机的工作流程如下：红外接收模块把接收到的红外发射管的红外光信号转换为电信号，由于接收后转换的电信号十分微弱，需要使用小信号放大器进行信号的低噪声放大。小信号放大器的后端为一个 LC 电路组成的选频网络，以滤除低频与工频(50 Hz)干扰信号，及高频噪声。将干净的音频电信号输入信号解调模块，输出中频信号后，经中频放大器放大后，进入检波输出富含音频特征的低频信号。低频信号经音频放大器放大后，驱动扬声器播放音质良好的声音。

2.3. 系统的关键技术

系统关键技术主要包括语音信号的调制、解调，以及高功率、低噪声的语音信号放大和输出。其中，语音信号的调制解调是系统关键技术种的重要内容。

系统红外发射管的工作模式为正弦波脉宽调制 SPWM(正弦脉宽调制) [8]。SPWM 相当于将正弦波分成振幅相等但宽度不等的 N 个方波脉冲。每个方波脉冲的宽度与当时相应正弦波的振幅成比例，从而产生与正弦波等效的 SPWM 波。在 SPWM 中，等腰三角波经常被用作载波，因为等腰三角波是上下宽度线性对称变化的波。当它与任何平滑曲线相交时，它可以在相交时控制开关器件的通断，以获得一组与曲线函数值成比例的等振幅和脉冲宽度的矩形脉冲[8] [9]。

SPWM 信号控制红外光发射电路以产生相应的红外光脉冲，此时红外管工作在开关状态，可以充分利用其最大输出功率和带宽，有利于增加传输距离，提高信噪比。在接收到相应的红外脉冲信号之后，接收电路通过低通滤波器滤除高频分量以获得相应的音频信号。

系统工作的语音信号频率在 300~3400 Hz 的范围内，因此我们可以将载波的频率设置为 200 KHz，这已经远大于语音信号中的最高频率。要实现 SPWM，需要三角波产生电路输出稳定的三角波信号，该三角波信号经过比较器后与音频信号一起输出 SPWM 波形。三角波产生电路可以通过积分电路由方波振荡器输出的方波产生。为了简化电路设计，这里使用了专用脉宽调制(PWM)控制器芯片 uA494。其内部振荡器可以产生稳定的三角波信号，并在其控制端输入音频信号。音频信号和三角波信号通过比较器后可以输入 SPWM 波形，用于驱动后红外发射管。

在设计硬件时，为了降低由于器件质量原因导致的设计结果的不确定性，可以使用仿真模拟工具对产品功能进行仿真分析。譬如使用 Multism 对信号放大、滤波、调制功能进行仿真，并不断地进行电路的优化设计与仿真，待仿真结果符合设计结果后可直接参考仿真电路图参数进行原理图设计，从而有效提高产品设计的效率和电路设计的成功率。产品设计过程使用常见的 CAD 工具如 Ultiboard 等进行印刷

电路图的绘制和 PCB 的设计。

3. 红外发射机的设计

红外发射完成机主要完成语音输入及放大、低通滤波、信号调制、红外管驱动发射等功能；包括音频转换电路、低频放大电路、音频滤波电路、信号调制电路、红外管发射电路以及电源供给电路。

3.1. 音频输入及放大模块

语音信号的幅度通常约为 400~500 mV。语音信号通过 3.5 毫米音频接口或麦克风输入，3.5 mm 耳机插孔用于输入语音信号，通过电容隔离去除直流分量。应在反馈回路中添加一个可调电阻器，以动态调整语音信号的放大。预先放大电路的增益约为 2~4 倍，并进行多级放大，以使语音信号达到伏特电平，用于后级的信号调制处理。放大器电路可以采用 ADI 公司的 AD795BH 放大器，具有 0.1 Hz~1 MHz 低频、极低电压和电流噪声的特点，特别适合高阻抗电路，如音频信号的采集和放大。利用 Multisim 软件进行基于 AD795BH 放大器芯片的电路设计，如图 2(a)所示为音频信号预先放大电路，图 2(b)为输入输出信号的仿真波形，上面波形为输入，下面波形为输出。

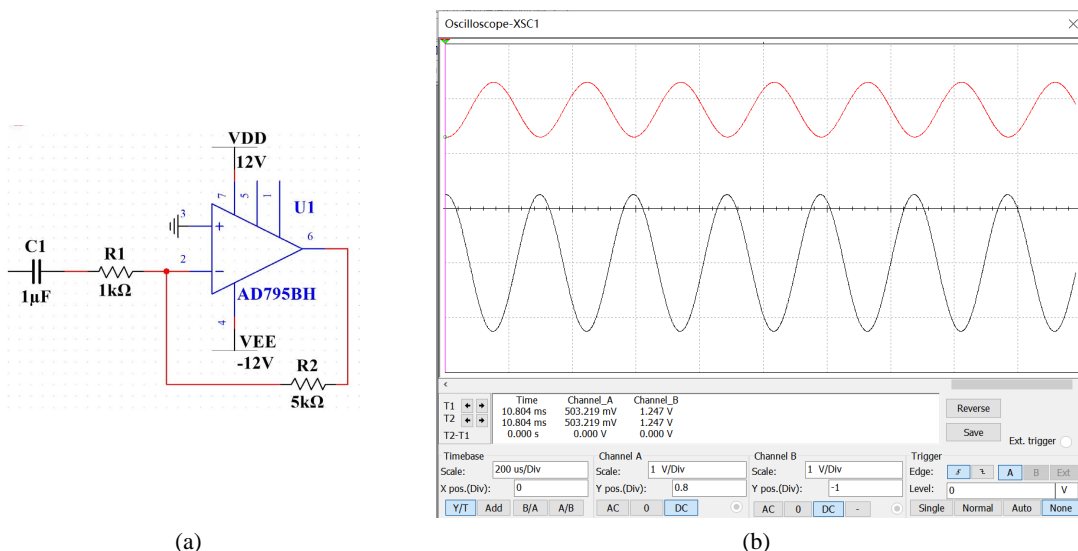


Figure 2. Audio signal pre-amplification circuit (a) and its waveform (b)
图 2. 音频信号预先放大电路(a)及其波形(b)

3.2. 音频滤波模块

根据音频信号的通用频率和器件限制，设定语音信号频率应小于 5 KHz，以降低对信号链路的整体带宽要求，并且保证语音信号的高保真，以达到较高的音频清晰度。低通滤波器用于实现带宽限制。低通滤波器的截止频率设置为 5 KHz。如图 3 所示，利用 Multisim 设计软件，设计了一种有源结构的二阶巴特沃斯低通滤波器。滤波器电路中使用的运算放大器与音频放大中使用的集成运算放大器 AD795BH 相同。

3.3. 信号调制模块

信号调制采用专用的 PWM 控制器芯片 uA494，芯片内置三角波产生电路和比较器，以实现较为准确的信号调制。内部电路由参考电压产生电路、振荡电路、间歇周期调节电路、两个误差放大器、脉宽

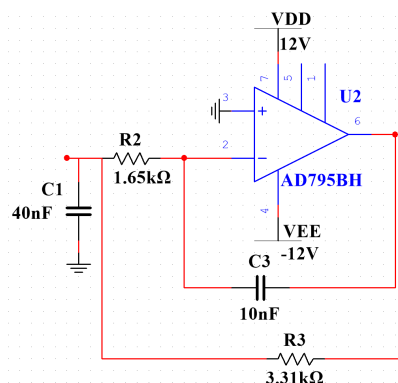


Figure 3. Filter circuit after audio signal amplification

图 3. 音频信号放大后的滤波电路

调制比较器和输出电路组成。其中，引脚 1 和引脚 2 是差分放大器 I 的同相和反相输入端子；3 引脚进行相位校正和增益控制；4 引脚为死区时间控制，当施加 0~3 V 电压时，截止时间可从 2% 线性变化至 100%；5、6 引脚分别用于外部振荡电阻和振荡电容器；引脚 7 为接地端子；8、9 引脚和 10、11 引脚分别是 uA494 中最后一级输出三极管的集电极和发射极；12 引脚为电源端子；13 引脚是输出控制端子；14 引脚为 5 V 参考电压输出端子，最大输出电流为 10 mA；15、16 个引脚是误差放大器 II 的反相和同相输入。

振荡器产生的锯齿形振荡波被发送到 PWM 比较器的反相器输入端，脉宽调制电压被发送到脉宽调制比较器同相输入端。PWM 比较器用于比较和输出一定宽度的脉冲。当宽度调制电压改变时，uA494 的输出脉冲宽度也改变，从而改变开关的接通时间。同时，死区时间控制引脚的输入端电压也通过死区时间比较器输出一定宽度的脉冲。两个脉冲在通过或门之后进入触发器，并驱动 NPN 晶体管 Q2 和 Q2 输出 PWM 波。语音信号直接输入死区时间控制引脚，差分运算放大器输入端直接接地，PWM 比较器的输出始终为 0。死区时间比较器输出是由输入信号调制的 PWM 波，只要输入信号 $V_{in} + 0.12 \text{ V}$ 大于锯齿波的最小值并且小于锯齿波的最大值 3.0 V，就可以获得所需的 SPWM 调制输出。由于 uA494 的内部锯齿波和比较器都由一个电源供电，因此输入正弦波也必须是单极的，最小值大于 0.12 V，最大值小于 3.0 V。考虑到放大的语音信号的幅度约为正负 1 V，uA494 输出应通过电阻网络偏置约 1.1 V 的合适正电压。

利用 Multisim 软件进行基于 uA494 芯片的电路设计，如图 4(a)所示为音频信号调制电路，图 4(b)为调制与已调信号的波形图。图 4(b)中，正弦波形为模拟音频的调制信号，等幅变频的高频信号波形为已调信号，信号的频率变化与调制信号的正弦波幅度变化一致。

3.4. 红外发射模块

在发射机系统中，红外发射模块的红外发射器件是 VISHAY 公司生产的 TSAL6100 高速红外 LED。它采用直径为 5 mm、峰值波长 λ_p 为 940 nm 的塑料封装。辐射强度(辐射通量)在 100 mA 工作电流时为 80 mW/sr，正向导通电压为 1.35 V。它具有高可靠性、高辐射功率、高辐射强度和 20° 的小发射角。它可以使用小功率 NPN 型三极管 SS8050 来驱动红外发光二极管。考虑到传输距离的要求，可以将多个红外发射管并联，以提供传输功率。

3.5. 替换模块

为验证系统模块化设计的可重构特性，在上述完整功能模块的设计之外，不同于前述的芯片型号，分别基于另一种调制器芯片 TL494 和另一种运放芯片 NE5534，额外设计了三种替换模块，分别为音频

放大模块、低通滤波模块和信号调制模块，目的是验证功能模块的单独替换和升级功能，即具有电路与系统的可重构特性(图 5)。

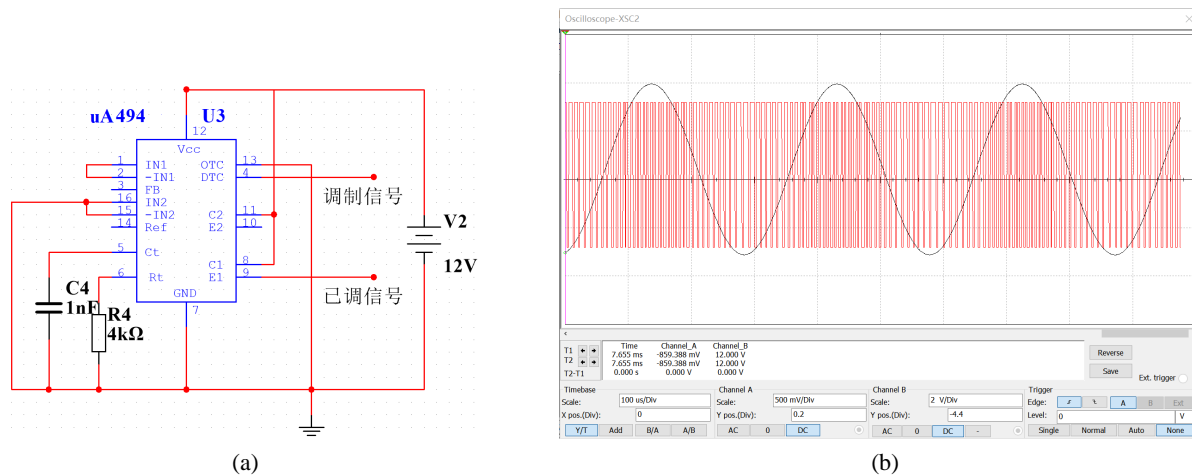


Figure 4. Audio signal modulation circuit (a) and its waveform (b)
图 4. 音频信号调制电路(a)及其波形(b)

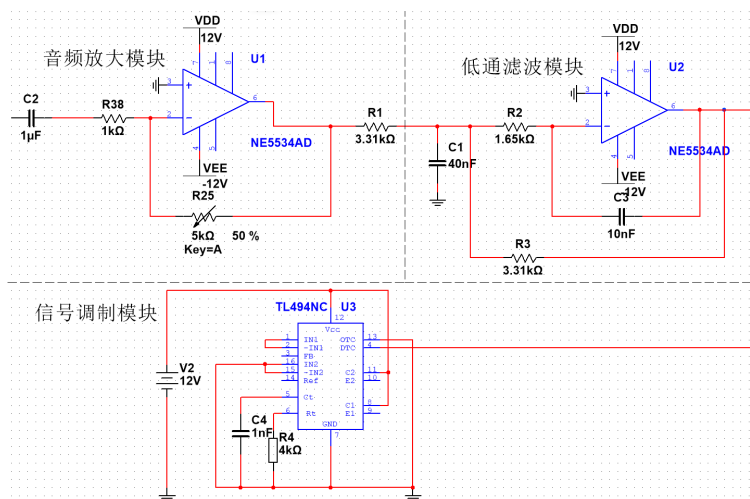


Figure 5. Three replaceable module circuit designs
图 5. 可供替换的三种模块电路设计

4. 红外接收机的设计

红外接收机装置包括红外接收电路、信号解调电路、后级放大及音频输出电路、扬声器输出电路以及电源供给电路，以实现低噪声、高音质输出的无线音频信号接收功能。

4.1. 红外接收模块

红外接收管可以是 PT26-21B 高速红外接收管。直径为 5 mm 的塑料封装具有 0.78 mm² 的高灵敏度光敏面积，940 nm 的光敏波长，以及在 12 V 电压下 20° 的 100 MHz 带宽光敏角。作为红外光接收模块，它可以直接与本系统的红外发射管相匹配。

红外接收管将接收到的红外光信号转换成电信号。考虑到当红外光传输距离变大时，接收信号强度

将非常弱，因此需要放大接收信号。放大电路由仪表放大器 INA128 组成，红外光接收电路由仪表放大差分输入接收，可以有效抑制背景噪声(实际上是外围背景红外光)。同时，配置小信号放大器放大约 100 倍，这样输出信号可以处于饱和放大区域(即输出处于“高电平和低电平”模式)，SPWM 信号可以很好地恢复。

4.2. 信号解调模块

SPWM 信号可以通过 uA494 解调后，进入低通滤波器电路恢复为语音信号。滤波器可以使用发射机中使用的基于 AD795BH 的有源低通滤波器电路结构，二者结构功能类似，这里不再重复。

4.3. 后级放大及音频输出模块

音频信号需要驱动外部负载扬声器，这需要大的输出电流。普通运算放大器的输出电流只有约 15 mA，不足以驱动耳机或扬声器。常用的音频功率放大器可以使用高功率音频放大器，如 LM386 音频功率放大器、TDA2030 或 LM1875，或 D 类音频放大器，例如 TI 的 TPA 系列。由于负载较小，本系统采用 CSC8002 芯片进行音频信号的后级放大及输出。该种电路结构与 AD795BH 放大器芯片组成的音频预放大电路类似，这里也不再阐述。该放大器可以通过电位器进行输出电压幅度的微调，以防止喇叭线圈因放大器输出的直流偏置信号而饱和。

在接收机支路的设计中，未基于其他类型芯片进行可替换模块的额外设计。发射机支路的可替换模块功能实现，已可验证本文创新与目的。

5. 系统集成与联调

在上述发射机及接收机组成的各功能模块电路设计制作完成后，进行全系统的全系统集成与联调。全系统的电源供给电路提供 $\pm 12\text{ V}$ 和 $+5\text{ V}$ 电源，以供给双电源供电的运放芯片，以及调制器芯片的工作电源。因为系统设计采用了模块化设计思路，因而发送机支路和接收机支路各自独立又相互联系，两个支路部分根据其功能划分为若干功能区域。成品电路图如图 6 所示的模块化设计的短距离无线传输系统。该成品电路组成与前面图 1 所示的音频信号短距离无线传输系统框图相对应。

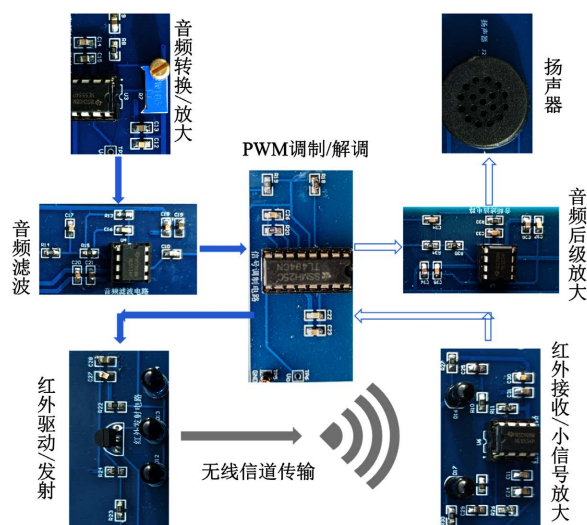


Figure 6. Short-distance wireless transmission system based on modular design

图 6. 模块化设计的短距离无线传输系统

系统通电测试时, 音频输入采取手机 MP3 的音频输入, 输出通过系统末端的扬声器进行监听, 调整接收机后级放大输出增益, 以获得良好的音质后, 通过示波器分别在发射机红外发射管的前级, 以及接收机红外接收管道后级进行波形监测, 波形图如图 7 所示。图 7(a)所示为发射机发射的调制信号的时域波形(图中上方波形)与接收机接收的调制信号的时域波形(图中下方波形)。图 7(b)所示为发射机发射的调制信号的频域波形(图中上方波形)与接收机接收的调制信号的频域波形(图中下方波形)。从两图中看出, 发射的调制信号与接收的调制信号特征吻合, 无线传输效果良好。

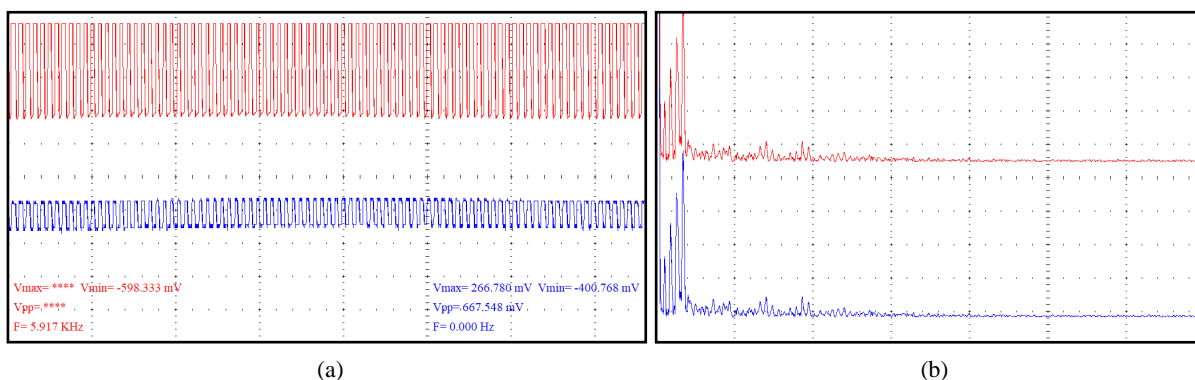


Figure 7. Time domain waveform (a) and frequency domain waveform (b) of wireless transmitted audio signals
图 7. 无线传输的音频信号时域波形(a)与频域波形(b)

为验证系统模块化设计的可重构特性, 将图 5 设计的三种可替换模块更换原模块, 进行系统功能测试后的波形如图 8 所示。为验证方便, 测试信号分别为发射机发射的音频信号(调制之前, 图中上面波形), 以及接收机接收的音频信号(解调之后, 图中下面波形)的时域信号。从图中可以发现, 两条波形基本吻合, 音频信号良好地进行了无线传输。

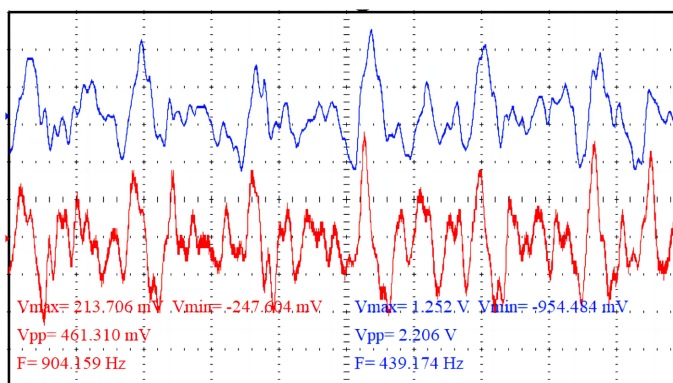


Figure 8. Comparison of time-domain waveforms of audio transmission and reception after replacing the replacement module
图 8. 更换替换模块后的音频发射和接收时域波形对比

6. 结束语

本文所设计制作的基于红外光通信的音频信号短距离无线传输系统中是以红外发光管和红外光接收模块作为收发器件, 在可重构的总体设计思路中, 红外发射与红外接收模块完全可以用其他工作频率的无线发射和接收模块替换。各放大、滤波模块亦功能完善, 即可单独使用, 又可全系统联调使用, 亦可

更新或换代, 替换成其他工作频率、增益、截止频率等的模块。本系统不同于以往基于参数与功能相对固定的芯片模块, 采用分立模块化设计, 以方便地进行模块替换及可重构式的技术更新升级, 为当前普遍基于功能、参数固定的收/发无线通信芯片模块的应用系统开发, 提供了新的思路。

基金项目

江苏省大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 202211055042Y; 202211055064Y), 常州工学院教学改革研究项目(项目编号: xxjk2022-3); 常州工学院“课程思政”建设项目(项目编号: 30120300100-22-kfk01; 30120300100-jxtd03)。

参考文献

- [1] 张艺琳, 王宜怀, 姚望舒, 范小青. 基于 Wi-Fi 与 433 MHz 频段的无线传感网通信网关设计[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(12): 115-120.
- [2] 赵威振, 宋晨炜, 王旭东, 陈怡媛, 吕斌, 陈国俊. 基于 WiFi 及 BLE 5.0 双模通信的光伏发电远程监控系统[J]. 物联网技术, 2023, 13(4): 43-45.
- [3] 基于蓝牙的智能家居控制器设计[J]. 世界电子元器件, 2022(4): 13-16.
- [4] 万国春, 张彤, 谢丽宇. 基于蓝牙通信的车规级氛围灯复杂状态控制实验[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(2): 45-49.
- [5] 张苏, 陈婧, 赵文昌. 基于 ZIG-BEE 技术的有机茶园监测控制系统[J]. 科学技术创新, 2022(3): 43-46.
- [6] 张彩娇. 基于 ZigBee 无线通信技术的基站安全监控系统设计[J]. 数字通信世界, 2023(3): 5-7.
- [7] 康泽威, 张晓亚, 陈元威. 基于 GPRS 无线网络的智能家居控制系统设计[J]. 电子世界, 2020(20): 138-139.
- [8] 马燕妮, 马平原, 张广法, 麻志峰, 徐扬. 基于 PAM 调制技术的红外光通信电路设计[J]. 仪表技术, 2019(9): 40-42.
- [9] 潘佳琪, 高韵淇, 黄膺达, 等. 基于 MSP430 单片机的红外光通信系统研究[J]. 科技创新与应用, 2020(9): 60-62.